



非接触式动态位姿测量方法研究

苏海龙^{1,2}, 张建国¹, 张峻霞¹, 胡军¹

(1. 天津科技大学机械工程学院 天津 300222; 2. 天津大学机械工程学院 天津 300072)

摘要: 针对非接触式动态位姿测量系统在人体运动信息检测的应用中对人体精细、微小动作测量精度的要求,提出了非接触式动态位姿测量系统的重构修正模型. 该模型以三维重构理论知识为基础,综合考虑影响测量系统精度的多种因素,给出了测量误差理论体系,确定了该模型的修正成像方程. 实验表明:通过基于修正模型的非接触式动态位姿测量系统进行静态标定和动态位姿参数测量,测量精度比修正前有明显提高.

关键词: 非接触式; 位姿测量; 测量方法; 修正模型

中图分类号: P234 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2009)03-0046-04

Study on Contactless Measuring Method of Dynamic Posture

SU Hai-long^{1,2}, ZHANG Jian-guo¹, ZHANG Jun-xia¹, HU Jun¹

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;
2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To meet the requirements for measurement accuracy in analyzing human fine and small motions in the application of contactless dynamic measuring system detecting human motion information, a reconstruction modified model for this system was proposed. Based on the theory of three-dimensional reconstruction and all kinds of factors affecting the measurement accuracy, the theoretical system of measurement error and the modified imaging equations were established. The experimental results show that the measurement precision of the modified system is sharply improved comparing with the measurement accuracy of non-modified system in static calibration and dynamic posture measurement with the system.

Keywords: contactless; posture measurement; measuring method; modified model

进行人体运动信息检测与处理,是以肢体活动为研究对象,精确测量和分析人体在运动过程中肢体的位移、速度、力及肌电信号等参量,并对其进行分析和处理. 在此类问题的研究中,利用基于普通摄像机的非接触式动态位姿测量系统进行肢体运动的重构与分析是一种重要方法. 通过对二维图像进行三维重构,可得到肢体在运动过程中的运动学及动力学参量,从而完成对各肢体运动过程的完整描述. 然而,由于人类肢体运动的灵活性、柔韧度极高,非接触式测量方法的测量精度就成为了衡量测量结果可靠与否的关键要素.

立体视觉技术是动态位姿测量的理论基础,其直

接模拟人类双眼处理景物的方式具有简单、可靠、使用范围广等特点,可进行非接触、自动、在线的检测,因而具有十分广阔的应用前景. 但建模角度不同,得到的测量精度也各不相同. 许多学者就如何最大限度的提高非接触式动态位姿测量系统的测量精度进行了探索性的研究. Abdel^[1]最早提出了 DLT (Direct Linear Transformation) 法,该方法建立了像点坐标与相应物点坐标的直接线性关系,具有一定的测量精度,并能自动对光心物理偏差进行校准,特别适合处理非量测摄像机所拍摄片. Wood^[2]较早地对如何提高 DLT 法的测量精度给出了相应的实验方法及标定步骤. Lenz^[3]研究了像片中心偏差对高精度机器定位

收稿日期: 2008-11-12; 修回日期: 2009-03-18

基金项目: 科技部863计划资助项目(2006AA040201); 天津市应用基础研究计划资助项目(07JCYBJC18700)

作者简介: 苏海龙(1976—),男,吉林人,讲师,博士研究生, suhailong@tust.edu.cn.

准确性的影响因子,并给出了减小这一误差的基本方程. 杨年峰^[4]讨论了像坐标误差对三维重构的影响,并分析了三维重构对各像坐标误差的敏感程度.

本文结合三维重构修正模型,综合考虑了影响测量精度的多种因素,并对原有成像模型进行了必要的修正,减小了由于系统本身及测量方法而带来的测量误差,提高了系统的测量精度.

1 模型建立

非接触式动态位姿测量是基于立体视觉成像原理. 其基本原理是利用至少两台位置相对固定的摄像机,从不同角度同时获取同一景物的多幅图像,通过计算空间点在两幅图像中的像差来获得其三维坐标值. 如图 1 所示, $M(x, y, z)$ 为空间任意一点,经测量系统成像后得到两幅平面图像,该点在两个平面图像坐标系中的坐标分别为 $m_1(x_1, y_1)$ 和 $m_2(x_2, y_2)$. 根据针孔摄像机的成像原理及摄影测量中的物点和像点空间几何关系,建立三维空间重构算法,即可由 $(x_i, y_i)(i=1, 2)$ 得到点 M 的三维坐标 (x, y, z) .

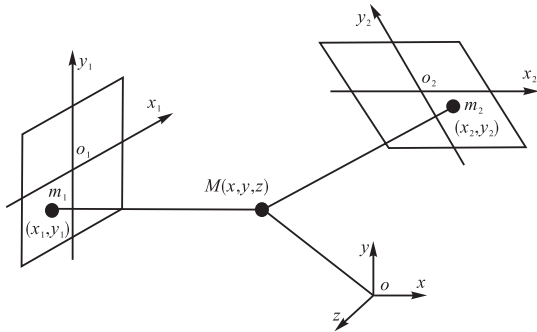


图 1 立体视觉成像原理

Fig.1 Three-dimensional visual imaging principle

空间任意点 $M(x, y, z)$ 在像平面坐标上成像 m 的构像方程为^[5]

$$\begin{cases} x_i = -f \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) + a_3(z-z_0)}{a_7(x-x_0) + a_8(y-y_0) + a_9(z-z_0)} \\ y_i = -f \frac{a_4(x-x_0) + a_5(y-y_0) + a_6(z-z_0)}{a_7(x-x_0) + a_8(y-y_0) + a_9(z-z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $(x_i, y_i)(i=1, 2)$ 为像点坐标; (x_0, y_0, z_0) 为摄像机光学中心的立体坐标; f 为摄像机的内方位元素(有

效焦距); $\mathbf{R}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}$ 为物方坐标系绕空间坐

标系的三个轴 $x \rightarrow y \rightarrow z$ 依次旋转角度 (θ, ψ, ϕ) 的空间位姿旋转变换矩阵,其各元素为关于此 3 个欧拉转

角的三角函数线性式^[6],此即为立体视觉物像点坐标空间变换式.

2 误差分析和修正方法

式(1)物点坐标的求解公式是在理想情况下得出的,但实际测量系统的构像模型存在诸多影响测量精度的因素,因而有必要对其影响因素进行分析和修正.

2.1 图像中心偏差

摄像机属物理硬件,因制造误差,由普通摄像机得到的图像中心与理论上的图像中心并不重合,若直接用图像中心点作为原点来计算像点坐标便产生了误差. 其偏差因子由式(2)决定.

$$\begin{cases} x'_i = x_i - x_0 \\ y'_i = y_i - y_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x_i, y_i) 为像点理论坐标; (x'_i, y'_i) 为像点实际坐标; (x_0, y_0) 为摄像机光轴与图像实际交点与图像理论中心点的坐标偏差. 在 DLT 算法中,此偏差包含在解算方程内部,在求解过程中并不出现,由其求解方程组自动规避此偏差,所以可以采用 DLT 算法克服此误差.

2.2 成像畸变差

实际工业条件下的光学成像系统总存在成像畸变差^[7],由于技术原因,制造严格无畸变差的物镜是不可能的. 因此畸变模型选取的正确与否直接决定其测量结果的精度. 设实际构像的辐射距为 r ,其差值 Δr 即为畸变差.

$$\Delta r = r - f \tan \alpha \quad (3)$$

式中 α 为物像点连线与光轴夹角. 由式(3)可知,物镜的畸变差与所选摄像机参数 f 有关. 此畸变也称径向畸变,而光学畸变的另一种畸变差——切向畸变差则可能由电噪声、电路工艺及光刻工艺等因素产生,一般很难得到其准确的数学模型,因其数值较小,所以切向畸变一般不予考虑. 由应用光学知识可知,径向畸变和视场的三次方成正比,即

$$\Delta r = kr^3 \quad (4)$$

式中: k 为畸变系数; r 表示视场空间半径,那么 Δr 在 x, y 两个方向的分量为

$$\Delta x = \Delta r \cdot \frac{x}{r} = xkr^2 \quad (5)$$

$$\Delta y = \Delta r \cdot \frac{y}{r} = ykr^2 \quad (6)$$

则有

$$\begin{cases} x = x_d - \Delta x = x_d(1 - kr^2) \\ y = y_d - \Delta y = y_d(1 - kr^2) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$; (x_d, y_d) 是畸变后的坐标; (x, y) 是理想坐标. 对式(7)进行修正, 用畸变后真实坐标替代理想坐标, 修正式为

$$\begin{cases} x_d = x'_i + x_0 - \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y_d = y'_i + y_0 - \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\bar{x} = x'_i - x_0$; $\bar{y} = y'_i - y_0$; $r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$.

2.3 尺度因子误差

图像像点坐标值从像素转换到毫米的变换过程中存在误差. 在将图像坐标从像素单位转换为毫米单位时, 需附加参数, 此参数即为尺度因子 (s_x, s_y) , 由此产生的误差称为尺度因子误差. 根据文献[5]的修正方法, 得到式(8)的修正式:

$$\begin{cases} x_d \cdot s_x = x'_i + x_0 - \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y_d \cdot s_y = y'_i + y_0 - \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)充分考虑了实验中影响三维重构的物理因素, 将基本的物像关系公式进行修正, 得到了描述较为完整精确的物像点空间坐标变换公式.

2.4 标定误差

在使用非量测摄像机的条件下, DLT 法的精度主要受标定误差影响. DLT 算法中通常使用空间立体校准框架进行标定, 因而其上控制点的分布便成为影响测量结果的主要因素, 文献[8]中给出了控制点设置方法. 采用文献[8]的校准框架, 实验中用于标定的自制校准框架如图 2 所示, 共布置 8 个标记点.

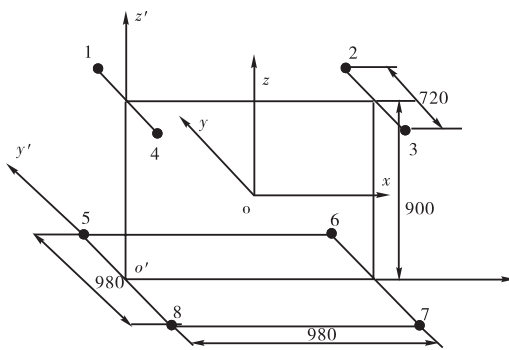


图 2 校准标定框架结构图

Fig.2 Calibration frame structure sketch

2.5 量测误差

正直摄影公式为^[9-10]

$$\begin{bmatrix} x = \frac{B}{\Delta p} x_1 & y = \frac{B}{\Delta p} f & z = \frac{B}{\Delta p} y_1 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

式中: (x_1, y_1) 为像点坐标; B 为摄影基线水平长度; Δp 为两个像点横坐标之差; (x, y, z) 为物点坐标. 对

式(10)取全微分, 并将 $\frac{B}{\Delta p} = \frac{y}{f}$ 代入得

$$\begin{cases} x' = \frac{dB}{B} \cdot \frac{x_1}{f} y - \frac{x_1 d\Delta p}{Bf^2} y^2 + \frac{dx_1}{f} y \\ y' = \frac{dB}{B} y - \frac{d\Delta p}{Bf} y^2 \\ z' = \frac{dB}{B} \cdot \frac{y_1}{f} y - \frac{y_1 d\Delta p}{Bf^2} y^2 + \frac{dy_1}{f} y \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 影响空间物点坐标的量测误差可分为两组: 一组是摄影基线和像点坐标的量测误差, 其影响与纵距 y 成比例; 另一组是两个像片的量测误差, 其影响与纵距 y 的平方成比例. 因而, 在视场可见目标点范围内, 如果目标点距离摄像机越近则精度越高. 根据此结论, 在实验过程中, 利用修正后模型降低摄影基线及像点坐标误差, 并在实验条件允许的情况下, 拉近被测物体与摄像机间的距离, 便可有效提高系统重构精度.

3 实验分析

利用上述修正模型构建的非接触式动态位姿测量系统, 分别进行了系统标定和位姿测量实验. 位姿测量实验包括静态位姿测量和动态位姿测量.

静态位姿测量实验选用 3 种几何对称图板, 给定图板中标记点 A, B, C , 其视场空间绝对坐标参考值由电磁测量系统的位置传感器给出, 其初值设为 $A(15.3, 36.2, 7.5)$ 、 $B(6.9, 25.2, 4.3)$ 、 $C(36.5, 10.2, 18.7)$. 用修正前和修正后的系统分别测量其坐标值, 测量图板如图 3 所示, 测量结果见表 1.



图 3 三种静态标定测量图板

Fig.3 Three kind of static calibration measuring panel

动态位姿测量装置如图 4 所示. 给标记球以初速度, 使其在光滑半圆环内做近似匀速运动, 利用内置的发射型速度传感器测量其速度, 并与测量系统测量结果进行比较. 相同实验做 50 次, 然后取其平均值, 实验数据如表 2 所示.

表1 静态位姿标记点坐标测量值比较

Tab.1 Comparison of static marking point's coordinate

| 图板样式 | 测量点 | 测量值/mm | |
|------|-----|------------------|------------------|
| | | 修正前 | 修正后 |
| 黑白方框 | A | (15.3,36.5,7.2) | (15.3,36.2,7.5) |
| | B | (6.8,25.0,4.5) | (6.9,25.2,4.3) |
| | C | (36.2,10.5,19.3) | (36.5,10.2,18.6) |
| 圆环框 | A | (15.5,36.6,7.8) | (15.3,36.1,7.6) |
| | B | (6.7,25.6,4.6) | (6.9,25.2,4.4) |
| | C | (36.9,10.4,19.5) | (36.4,10.3,18.8) |
| 黑白圆框 | A | (15.9,37.0,8.2) | (15.3,36.3,7.6) |
| | B | (6.8,25.7,4.0) | (6.8,25.2,4.4) |
| | C | (36.0,11.2,17.3) | (36.7,10.2,18.7) |



图4 动态位姿测量示意图

Fig.4 Sketch map of dynamic posture measuring

表2 动态位姿标记点速度测量值比较

Tab.2 Comparison of dynamic marking point's velocity

| 实验编号 | 标记球球心速度/(m·s ⁻¹) | | |
|------|------------------------------|------|-------|
| | 修正前 | 修正后 | 测速传感器 |
| 第1组 | 6.87 | 6.92 | 6.96 |
| | 5.01 | 5.10 | 5.08 |
| | 6.81 | 6.69 | 6.73 |
| 第2组 | 4.85 | 5.02 | 4.98 |
| | 5.03 | 5.20 | 5.21 |
| | 5.98 | 5.76 | 5.77 |

由表1和表2实验数据可见,基于修正模型建立的测量系统与修正前测量系统相比较,静态位置测量精度和动态速度测量精度均有提高,动态测量误差小于0.81%。实验结果表明,基于修正模型的测量系统具有较好的测量效果。

4 结 语

基于空间重构模型的测量系统,其测量精度对实际问题的求解与研究有着非常重要的影响。重构模型构建的是否准确和完整将直接关系到最后的测量结果是否有实用价值。对于人类肢体这种极为精细、

复杂运动的研究,全面考虑测量系统建模的影响因素,尽可能地提高系统的测量精度是保证测量结果准确的重要手段。

通过综合分析和考虑各方面因素的影响,给出了测量系统的修正模型,构建了非接触式动态位姿测量系统,并利用该系统对自制的校准框架、标定图板及运动圆球的运动学参数进行了测量,对测量结果与其标称值比较。结果表明,测量系统已具有较高的测量精度。以后研究的重点将放在进一步完善测量系统的标定手段及如何实现在线实时测量位姿并进行在线反馈控制。

参考文献:

- [1] Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates in close range photogrammetry[C]// Proceeding of the ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry, Virginia, USA: American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971: 1-18.
- [2] Wood G A, Marshall R N. The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis[J]. J Biomechanics, 1986, 19(9): 781-785.
- [3] Lenz R K, Tsai R Y. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-D machine metrology[J]. IEEE Trans Patt and Machine Intell, 1988, 10(5): 713-720.
- [4] 杨年峰,王季军,黄昌华,等. DLT算法中象平面误差对三维重构的影响[J]. 中国生物医学工程学报, 2000, 19(2): 121-130.
- [5] 熊聪聪,苏海龙,张建国. 基于普通摄像机成像系统测量的误差分析[J]. 海洋测绘, 2003, 23(4): 12-14.
- [6] 胡海峰,熊银根. 三维机器视觉中摄像机内外方位元素的确定[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2002, 41(6): 22-25.
- [7] 李德仁,王新华. CCD阵列相机的几何标定[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(4): 308-313.
- [8] 孙先逵,秦岚. 一种新型非接触位姿检测系统研究[J]. 光电工程, 2007, 34(1): 50-54.
- [9] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002: 165-181.
- [10] Fabio Gazzani. Comparative assessment of tow algorithms for calibrating stereophotogrammetric systems[J]. Biomechanics, 1993, 26(12): 1448-1454.